

УДК 621.9.048.7:621.9.048.6

doi:10.20998/2413-4295.2017.23.05

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ КОМБІНОВАНОГО ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА ОЗДОБЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ X12МФ

Д. А. ЛЕСИК^{1*}, В. В. ДЖЕМЕЛІНСЬКИЙ¹, Б. М. МОРДЮК², Г. І. ПРОКОПЕНКО², О. О. ДАНИЛЕЙКО¹

¹ кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, УКРАЇНА

² відділ фізичних основ інженерії поверхні, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, Київ, УКРАЇНА

*email: lesyk_d@ukr.net

АНОТАЦІЯ В даній роботі, для підвищення фізико-механічних властивостей робочих поверхонь виробів запропоновано спосіб комбінованого лазерно-ультразвукового поверхневого зміцнення з використанням сканувального лазерного променя та ультразвукового багатобойкового наконечника. Для реалізації комбінованого термодформаційного зміцнення та оздоблювання визначено вплив режимів лазерної термообробки та ультразвукової ударної обробки на властивості поверхневого шару сталі X12МФ з використанням багатофакторного експерименту із елементами аналізу дисперсії та рівнянь регресії. Встановлено, що процес лазерного термозміцнення сталі необхідно реалізовувати при температурі нагрівання 1250...1300 °C та швидкості обробки 80...100 мм/хв., а процес ультразвукового деформаційного зміцнення – при амплітуді ультразвукових коливань 18 мкм та тривалості обробки 100...120 с.

Ключові слова: лазерна термообробка; ультразвукова ударна обробка; сталь X12МФ; поверхневий шар; твердість; шорсткість.

DETERMINATION OF OPTIMUM REGIMES OF COMBINED LASER-ULTRASONIC HARDENING AND FINISHING OF TOOL STEEL AISI D2

D. LESYK^{1*}, V. DZHEMELINSKYI¹, B. MORDYUK², G. PROKOPENKO², O. DANYLEIKO¹

¹ Department of Laser Systems and Applied Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

² Department of Physical Fundamentals of Surface Engineering, Kurdyumov Institute for Metal Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT To improve the physical and mechanical properties of working surfaces of products, a new method combined laser-ultrasonic surface hardening and finishing using a scanning laser beam ultrasonic multiple impact head was suggested. The surface layers of cold worked tool steel AISI D2 were hardened by laser heat treatment and by ultrasonic impact treatment. The laser transformation hardening process was implemented using a 1 kW solid state fiber-laser with scanning optics and PID closed loop temperature control. The ultrasonic deformation hardening process was carried out by means of a 0.3 kW ultrasonic generator and ultrasonic oscillatory system, which contained a piezoceramic transducer, step-like horn and the impact head with seven cylindrical pins. The single-path processes were studied. This paper is focused on experimental analysis of the effects of heating temperature (1200...1340 °C) and specimen feed rate (40...140 mm/min) used at the laser transformation hardening process on the hardening depth and surface hardness/microhardness of subsurface layer, as well as the effects of the vibration amplitude of ultrasonic horn (15...18 μm) and treatment duration (60...240 s) at ultrasonic impact peening on the surface roughness/waviness and hardness using response surface methods. The experimental plan is based on a miscellaneous design matrix method. The quadratic regression equations for predicting the studied output parameters were developed. The optimum regimes of the laser transformation hardening and ultrasonic impact peening processes were determined based on the highest surface hardness and minimum roughness/waviness. It was established that the process of laser transformation hardening should realize at heating temperature 1250...1300 °C and specimen feed rate 80...100 mm/min, and the ultrasonic impact peening process – at vibration amplitude of ultrasonic horn 18 mm and treatment duration 100...120 s.

Keywords: laser heat treatment; ultrasonic impact treatment; AISI D2 steel; surface layer; hardness; roughness.

Вступ

Надійність та стійкість деталей машин/виробів в великій мірі визначається шорсткістю поверхні та формою мікрорельєфу поверхні, а також мікроструктурою, мікротвердістю та величиною залишкових макронапружень поверхневих шарів, які

зазнають найбільш значні навантаження в процесі експлуатації.

Незважаючи на значну зносостійкість легованих інструментальних сталей, багато досліджень проводиться для підвищення їх експлуатаційних властивостей за рахунок зміни структури приповерхневих шарів [1,2].

Підвищення зносостійкості робочих поверхонь відповідальних деталей сучасними методами лазерного поверхневого зміцнення представляє особливий інтерес для дослідників з огляду істотного впливу модифікованої структури з дрібнодисперсними карбідами [3].

Крім того, використання високоміцних та зносостійких матеріалів, в тому числі і високолегованих сталей, для підвищення ресурсу роботи штампового інструменту не завжди задовольняє експлуатаційні властивості та економічно не вигідні. Перспективними є розробка та реалізація новітніх виробничих технологій.

Лазерна термообробка (ЛТО) є один із поширених методів для підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей, які працюють в екстремальних умовах [4]. В літературі досить широко представлені результати дослідження впливу лазерного випромінювання на структурно-фазові перетворення та мікротвердість інструментальних сталей [5-7]. Технологія поверхневого лазерного термічного зміцнення полягає в передачі та поглинанні енергії високої концентрації тонкому поверхневому шарі виробу.

Крім того, для зменшення механічного зношування металевих виробів все частіше розробляються та застосовуються на виробництві комбіновані (гібридні) процеси лазерного термодформаційного зміцнення [8,9] з використанням як статичних, так і динамічних методів поверхнево-пластичної деформації.

Ефективним методом зміцнення та оздоблювання поверхонь металевих матеріалів серед методів поверхнево-пластичної деформації є безабразивна ультразвукова фінішна обробка або ультразвукова ударна обробка (УЗУО) за рахунок інтенсивного поверхневого деформаційного подрібнення структурних складових поверхневого шару [10].

Таким чином, розвиток нових промислових технологій відбувається в напрямку комплексування відомих технологій в гібридні та комбіновані процеси. Одним з ефективних комбінованих методів поверхневого зміцнення робочих поверхонь виробів є використання лазерного термічного зміцнення та наступного ультразвукового деформаційного зміцнення (ЛТО+УЗУО).

Мета роботи

Метою даної роботи є встановлення оптимальних режимів лазерного термічного зміцнення сканувальним лазерним променем та ультразвукового деформаційного зміцнення багатобойковим наконечником з огляду на покращення глибини зміцнення і твердості поверхні (мікротвердості) при ЛТО, а також шорсткості, хвилястості та твердості поверхні при УЗУО інструментальної сталі Х12МФ.

Виклад основного матеріалу

Матеріалом для проведення експериментальних досліджень було використано інструментальну сталь Х12МФ в початковому відпалювальному стані, виходячи із широкого використання в машинобудуванні та необхідності підвищення якості поверхневого шару деталей, які працюють в екстремальних умовах.

В даній роботі експериментальне дослідження процесів формування поверхневого шару проводили при постановці багатофакторного експерименту окремо як для ЛТО, так і для УЗУО, на основі яких визначали оптимальні режими для проведення комбінованої обробки. При цьому в якості факторів використовували наступні технологічні режими: температура нагрівання (T) і швидкість переміщення зразка (S) при ЛО (табл. 1), а також амплітуда ультразвукових коливань концентратора ($A_{узк}$) та тривалість обробки ($t_{узк}$) при УЗУО (табл. 2).

Таблиця 1 – Межі варіювання факторів при ЛТО сталі Х12МФ

| Фактори | Рівні факторів | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------|------------|
| | $x_{\min} (-1)$ | $x_{\max} (+1)$ | $x_0 (0)$ | Δx |
| $A(x_1)$ – температура нагрівання T ($^{\circ}\text{C}$) | 1200 | 1340 | 1270 | 70 |
| $B(x_2)$ – швидкість переміщення зразка S (мм/хв) | 40 | 140 | 90 | 50 |

Таблиця 2 – Межі варіювання факторів при УЗУО сталі Х12МФ

| Фактори | Рівні факторів | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------|------------|
| | $x_{\min} (-1)$ | $x_{\max} (+1)$ | $x_0 (0)$ | Δx |
| $A(x_1)$ – амплітуда ультразвукових коливань $A_{узк}$ (мкм) | 15 | 18 | 16.5 | 1.5 |
| $B(x_2)$ – тривалість обробки $t_{узк}$ (с) | 60 | 240 | 150 | 90 |

Значення інших технологічних параметрів режимів обробки – ширина і швидкість сканування лазерного променя, статичне навантаження ультразвукового інструменту, частота ультразвукових коливань концентратора, діаметр деформуючого бойка встановлювали постійними, які були визначені на основі попередніх досліджень та рекомендацій.

Досліджуваними вихідними параметрами були глибина зміцнення (h_z), мікротвердість приповерхневого шару ($H\mu$) та поверхнева твердість (HRC) при ЛТО, а також середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості (Ra), середнє арифметичне відхилення профілю хвилястості (Wa) та поверхнева твердість (HRC) при УЗУО.

Лазерну термообробку (ЛТО) зразків проводили за допомогою лазерного технологічного комплексу, який містить волоконний лазер Rofin Sinar FL010 з максимальною вихідною потужністю 1 кВт, установку з числовим програмним керуванням (ЧПК), 2D оптичну систему Scanlab Hurriscan25, лазерний двоколірний пірометр Impac Igar 12LO та спеціальне програмне забезпечення для контролю температури нагрівання та параметрів сканування лазерного променя [8,11].

ЛТО зразків здійснювали в діапазоні температури нагрівання 1200...1340 °C та швидкості переміщення зразка 40...140 мм/хв (табл. 1) при постійних величинах швидкості сканування 1000 мм/с та ширині сканування 10 мм лазерного променя.

Наступну ультразвукову ударну обробку (УЗУО) здійснювали на технологічній установці з ЧПК, що включала ультразвуковий генератор УЗГ250 (частотою 21.6 кГц і потужністю 0.3 кВт) та ультразвукову коливальну систему з п'єзокерамічним перетворювачем, ступінчастим концентратором та багатобойковим наконечником із сімома циліндричними бойками [10,11].

УЗУО зразків здійснювали в діапазоні амплітуди ультразвукових коливань концентратора 15...18 мкм та тривалості обробки 60...240 с при постійних величинах статичного навантаження деформаційного інструменту 50 Н та частоти обертання наконечника 76 об⁻¹.

Експериментальні дані оцінювали згідно квадратичної регресійної моделі:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (1)$$

де y – цільова функція (досліджувані вихідні параметри), яка розраховується моделлю, b_0 – сталий коефіцієнт регресії, b_1 , b_2 , b_{12} , b_{11} , b_{22} – коефіцієнти регресії, x_1 , x_2 – змінні, які відповідають факторам експерименту (вхідні режими ЛТО та УЗУО).

У відповідності з вибраним планом (3²) було проведено 9 експериментів як для ЛТО, так і для УЗУО. План експерименту ЛТО та УЗУО сталі Х12МФ приведено відповідно у таблицях 3 та 4.

Таблиця 3 – Матриця планування експерименту при ЛТО сталі Х12МФ

| № | № екс. | x_1 (Т) | x_2 (S) | x_1 (Т) | x_2 (S) | y_1 (h_3) мкм | y_2 (H_μ) ГПа | y_3 (HRC) |
|---|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|-----------------------|-------------|
| 1 | 5 | 0 | 0 | 1270 | 90 | 310 | 6.75 | 52.1 |
| 2 | 9 | + | + | 1340 | 140 | 240 | 7.2 | 52.7 |
| 3 | 6 | + | 0 | 1340 | 90 | 270 | 6.85 | 52.4 |
| 4 | 1 | - | - | 1200 | 40 | 170 | 6.7 | 47 |
| 5 | 7 | - | + | 1200 | 140 | 80 | 5.6 | 33.8 |
| 6 | 3 | + | - | 1340 | 40 | 290 | 6.7 | 51.5 |
| 7 | 4 | - | 0 | 1200 | 90 | 140 | 5.7 | 45.2 |
| 8 | 8 | 0 | + | 1270 | 140 | 230 | 6.9 | 54.8 |
| 9 | 2 | 0 | - | 1270 | 40 | 380 | 5.7 | 51.2 |

Таблиця 4 – Матриця планування експерименту при УЗУО сталі Х12МФ

| № | № екс. | x_1 (A_{y3k}) | x_2 (t_{y3}) | x_1 (A_{y3k}) | x_2 (t_{y3}) | y_4 (R_a) мкм | y_5 (W_a) мкм | y_6 (HRC) |
|---|--------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| 1 | 7 | - | + | 15 | 240 | 0.27 | 0.23 | 28.4 |
| 2 | 4 | - | 0 | 15 | 150 | 0.31 | 0.33 | 28.6 |
| 3 | 5 | 0 | 0 | 16.5 | 150 | 0.32 | 0.38 | 29 |
| 4 | 9 | + | + | 18 | 240 | 0.29 | 0.55 | 29.3 |
| 5 | 3 | + | - | 18 | 60 | 0.16 | 0.4 | 27.7 |
| 6 | 1 | - | - | 15 | 60 | 0.13 | 0.14 | 27.1 |
| 7 | 6 | + | 0 | 18 | 150 | 0.34 | 0.6 | 29.6 |
| 8 | 2 | 0 | - | 16.5 | 60 | 0.15 | 0.23 | 27.5 |
| 9 | 8 | 0 | + | 16.5 | 240 | 0.28 | 0.4 | 28.6 |

Планування експерименту, статистичну обробку отриманих результатів, побудову та аналіз рівнянь регресії проводили за допомогою статистичного програмного пакету «Design-Expert V7», зокрема модулю «Response Surface Method». Дисперсійний аналіз результатів експериментальних досліджень проводили за допомогою модулю «ANOVA».

Дослідження мікрорельєфу поверхні зразків, а також зони термічного та деформаційного впливу проводили на оптичному профілометрі Leica DCM3D за допомогою конфокального об'єктиву 10XLD. Параметри профілю мікрорельєфу поверхні визначали на базовій довжині 0.8 мм у відповідності з міжнародним стандартом ISO4287, а параметри топографії мікрорельєфу поверхні – ISO25178. Мікротвердість зміцнених шарів в поперечному перерізі та поверхневу твердість оцінювали з використанням відповідно цифрового мікротвердоміра FM800 та цифрового твердоміра Computest SC.

Обговорення результатів

Діапазон оптимальних технологічних режимів ЛТО та УЗУО досліджуваної сталі здійснювали на основі аналізу результатів проведеного багатофакторного експерименту. Зокрема, адекватність розроблених моделей оцінювали за допомогою дисперсійного аналізу шляхом аналізу основних коефіцієнтів моделі (табл. 5).

Дисперсійний аналіз (табл. 5) показує, що розроблені квадратичні регресійні моделі відгуку глибини зміцнення (h_3) та мікротвердості (H_μ)/твердості (HRC) поверхні при ЛТО, а також шорсткості (R_a), хвилястості (W_a) та твердості (HRC) поверхні при УЗУО є адекватними тому, що величини значимості моделі є меншими, чим 0.05. Крім того, коефіцієнти детермінації знаходяться в діапазоні $0 \leq R^2 \leq 1$, а значення точності є більшим за 4 та значення коефіцієнтів варіювання моделі є порівняно

низькими, що дозволяє стверджувати про високу точність та надійність отриманих результатів.

Таблиця 5 – Дисперсійний аналіз досліджуваних параметрів при ЛТО та УЗУО сталі Х12МФ

| Коефіцієнти моделі | ЛТО | | | УЗУО | | |
|--|-------------|--------------|-------------|------------|------------|-------------|
| | $y_1 (h_s)$ | $y_2 (H\mu)$ | $y_3 (HRC)$ | $y_4 (Ra)$ | $y_5 (Wa)$ | $y_6 (HRC)$ |
| Значення критерію Фішера | 18,20 | 9,62 | 36,61 | 748,2 | 33,81 | 54,37 |
| Значення адекватності | 0,018 | 0,045 | 0,006 | 0,0001 | 0,007 | 0,003 |
| Коефіцієнт детермінації (R^2) | 0,96 | 0,94 | 0,98 | 0,99 | 0,98 | 0,98 |
| Скоригований коефіцієнт детермінації (R^2) | 0,91 | 0,84 | 0,95 | 0,99 | 0,95 | 0,97 |
| Передбачений коефіцієнт детермінації (R^2) | 0,61 | 0,37 | 0,80 | 0,99 | 0,84 | 0,86 |
| Точність відгуку | 12,8 | 9,2 | 16,8 | 67,6 | 16,9 | 20,3 |

Таким чином, виявлено, що основний вплив на величину глибини зміцнення та мікротвердості (твердості) поверхні має температура нагрівання. При УЗУО значніший вплив на величину шорсткості, хвилястості та твердості поверхні відіграє тривалість обробки.

Квадратичні рівняння регресії (математичні моделі) для функції відгуку глибина зміцнення та мікротвердості/твердості поверхні при ЛТО (рівняння 2-4), а також шорсткості, хвилястості та твердості поверхні при УЗУО (рівняння 5-7) сталі Х12МФ, згідно проведеного багатофакторного експерименту для кодованих значень, має вигляд:

$$h_s = 312.2 + 68.3A - 48.3B + 10AB - 108.3A^2 - 8.3B^2, \quad (2)$$

$$H\mu = 6.6 + 0.5A + 0.3B + 0.05AB - 0.1A^2 - 0.1B^2, \quad (3)$$

$$HRC = 51.9 + 2.4A + 1.1B + 0.37AB - 1.5A^2 + 0.1B^2, \quad (4)$$

$$Ra = 0.4 + 0.04A - 0.01B - 0.02AB + \dots - 0.1B^2, \quad (5)$$

$$Wa = 1.08 + 0.26A + 0.03B - 0.09AB + \dots - 0.17B^2, \quad (6)$$

$$HRC = 26.11 + 0.43A - 0.78B + 0.20AB + \dots + 0.68B^2, \quad (7)$$

Відповідно, для дійсних значень факторів квадратичні рівняння регресії (експериментальні моделі) для функції відгуку глибина зміцнення та мікротвердості/твердості поверхні при ЛТО (рівняння 8-10), а також шорсткості, хвилястості та твердості поверхні при УЗУО (рівняння 11-13) має вигляд:

$$h_s = -36200.32 + 56.87T - 3.99S + \dots - 3.33 \cdot 10^{-3} S^2, \quad (8)$$

$$H\mu = -54.18 + 0.08T - 6.47S + \dots - 3.33 \cdot 10^{-5} S^2, \quad (9)$$

$$HRC = -492.12 + 0.82T - 0.12S + \dots + 4.0 \cdot 10^{-5} S^2, \quad (10)$$

$$Ra = -0.28 + 0.01A + 0.6t - 2.5 \cdot 10^{-3} At + \dots - 0.11t^2, \quad (11)$$

$$Wa = 3.3 - 0.48A + 3 \cdot 10^{-3} t + \dots - 1.37 \cdot 10^{-5} t^2, \quad (12)$$

$$HRC = 32 - 1A + 0.03t + 5.5 \cdot 10^{-4} At + \dots - 1.2t^2, \quad (13)$$

Отримані вище математичні моделі (рівняння 2-7) для кодованих факторів (змінних) пов'язані з кодованими режимами лазерного термозміцнення та ультразвукового деформаційного зміцнення, а експериментальні моделі (рівняння 8-13) за умовами дійсних факторів (змінних) пов'язані з дійсними (експериментальними) значеннями режимів ЛТО та УЗУО.

Таким чином, на основі вище приведенного дисперсійного аналізу, отримані квадратичні регресійні моделі характеризується високою точністю та можуть бути використані для керування глибиною зміцнення та мікротвердістю/твердістю поверхні в залежності від температури нагрівання та швидкості ЛТО, а також шорсткості, хвилястості та твердості поверхні в залежності від амплітуди ультразвукових коливань концентратора та тривалості УЗУО сталі Х12МФ. Зокрема, взаємозв'язок між дійсними і передбаченими значеннями поверхневої твердості як при ЛТО, так і при УЗУО приведено на рис. 1, що підтверджує адекватність розроблених моделей.

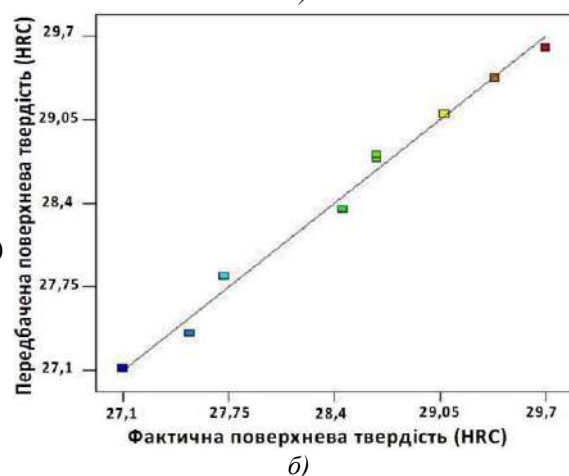
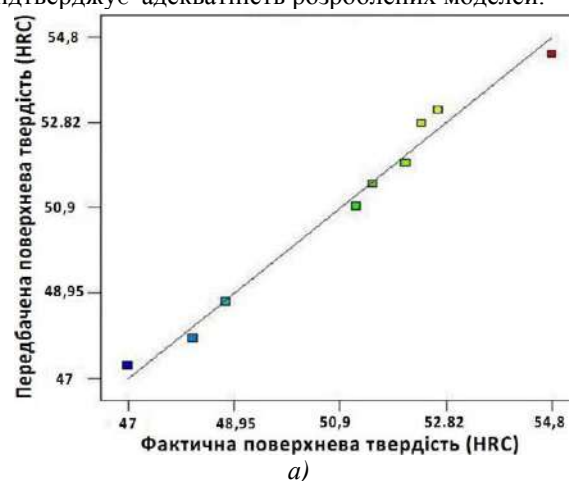


Рис. 1 – Взаємозв'язок між дійсними та передбачуваними величинами поверхневої твердості при ЛТО (а) та УЗУО (б)

Поверхні відгуків цільової функції – глибина зміцнення, а також мікротвердість приповерхневого шару та твердість поверхні в площинах параметрів впливу температури нагрівання та швидкості ЛТО приведено на рис. 2,3.

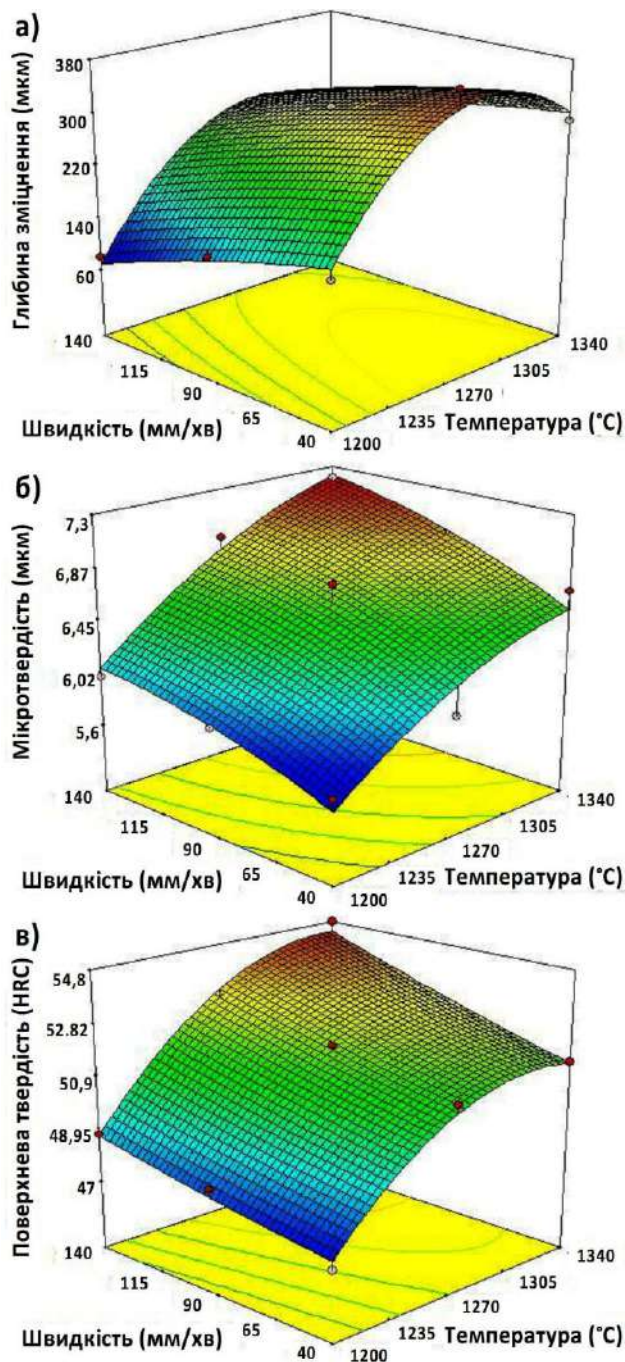


Рис. 2 – Вплив температури нагрівання та швидкості ЛТО на глибину зміцнення (а), мікротвердість приповерхневого шару (б) та поверхневу твердість (в) сталі X12MF у 3D площині

Попередні експериментальні дослідження показали, що при температурі нагрівання нижче 1200 °C та швидкості обробки 40...140 мм/хв

не було виявлено зони термічного впливу. При температурі нагрівання 1200 °C глибина зміцнення поверхневого шару складає ~130 мкм (твердість поверхні ~HRC 45), що є недостатнім при експлуатації виробів в екстремальних умовах. Подальше збільшення температури нагрівання до 1270 °C привело до збільшення як величини зони зміцнення, так і твердості поверхні (рис. 2а-в). При цьому мікротвердість приповерхневого шару складає 6,75 МПа (швидкість ЛТО 90 мм/хв).

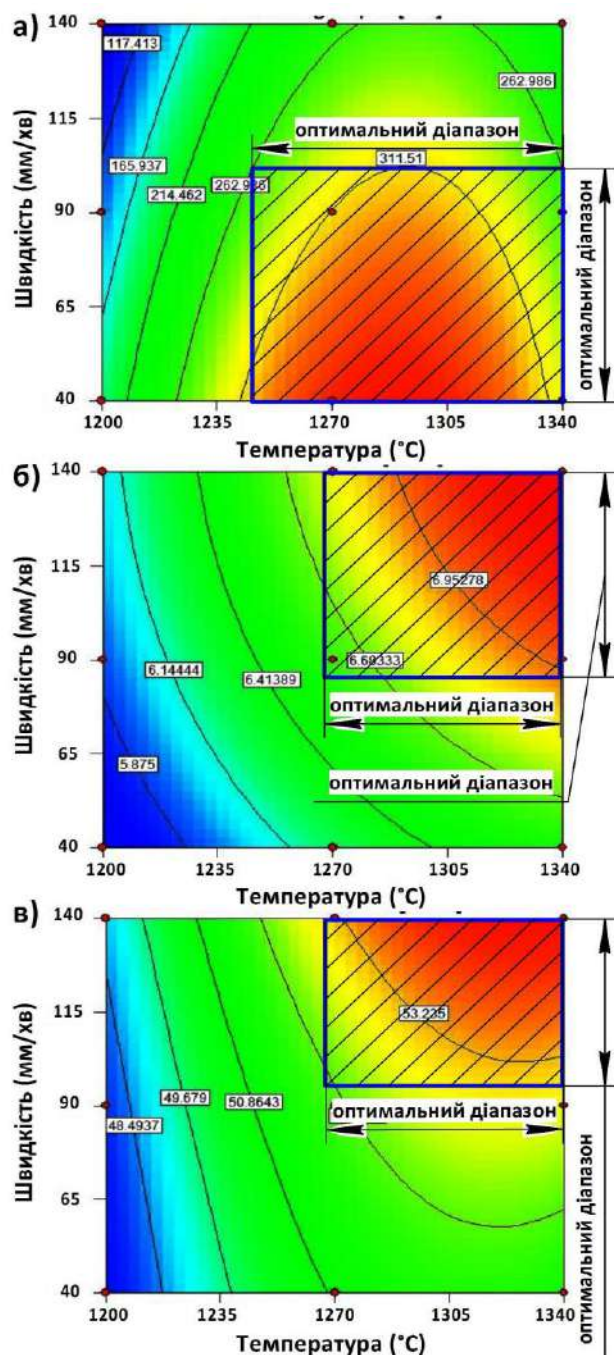


Рис. 3 – Вплив температури нагрівання та швидкості ЛТО на глибину зміцнення (а), мікротвердість приповерхневого шару (б) та поверхневу твердість (в) сталі X12MF у 2D площині

При температурі нагрівання 1340 °С спостерігається незначне зменшення глибини зміцнення в порівнянні з температурою нагрівання 1270 °С. При цьому твердість поверхні (~HRC 52) практично не змінюється. Це може бути пов'язано, що при даних режимах ЛТО досліджуваної сталі відбувається надмірне нагрівання.

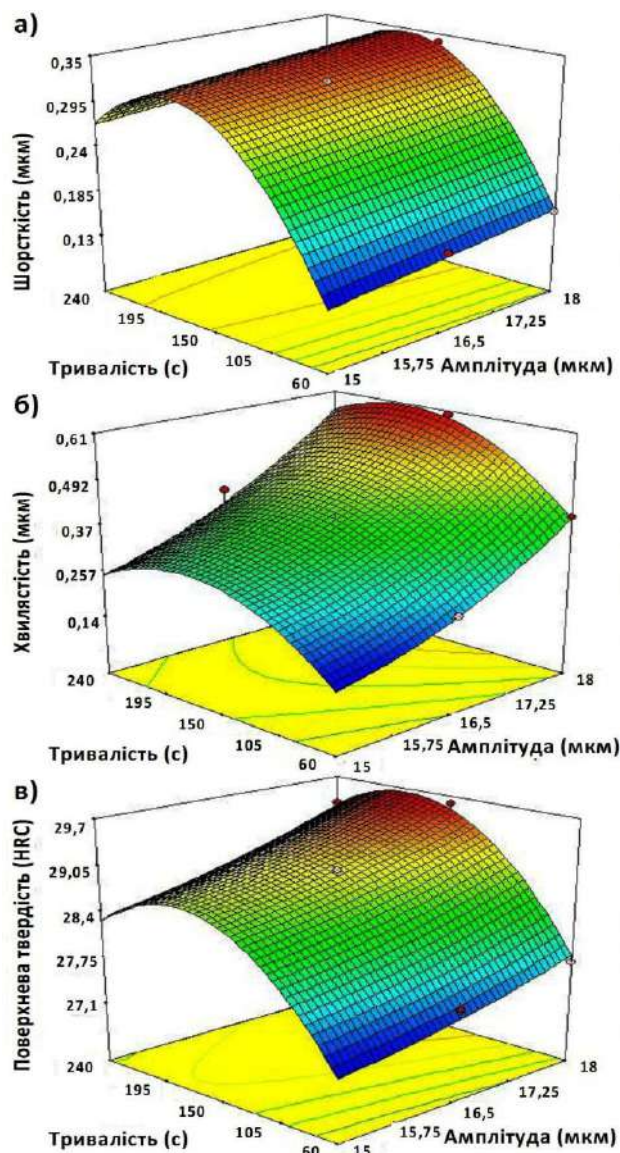


Рис. 4 – Вплив амплітуди ультразвукових коливань концентратора та тривалості УЗУО на шорсткість (а), хвилястість (б) та поверхневу твердість (в) сталі X12МФ у 3D площині

Крім того, виявлено, що при ЛТО спостерігається зменшення параметрів профілю зони зміцнення та збільшення твердості поверхні зі збільшенням швидкості ЛТО ($S = 140$ мм/хв) внаслідок зменшення швидкості охолодження приповерхневих шарів (рис. 3а). Це сприяє формуванню більш однорідної мікроструктури

зміцненого шару. Незважаючи на кращу твердість поверхні, зміцнена зона при максимальній швидкості обробки має недостатню глибину зміцнення (~240 мкм). Найбільші значення твердості поверхні спостерігається при максимальній температурі нагрівання та швидкості переміщення оброблюваної поверхні (рис. 3б,в).

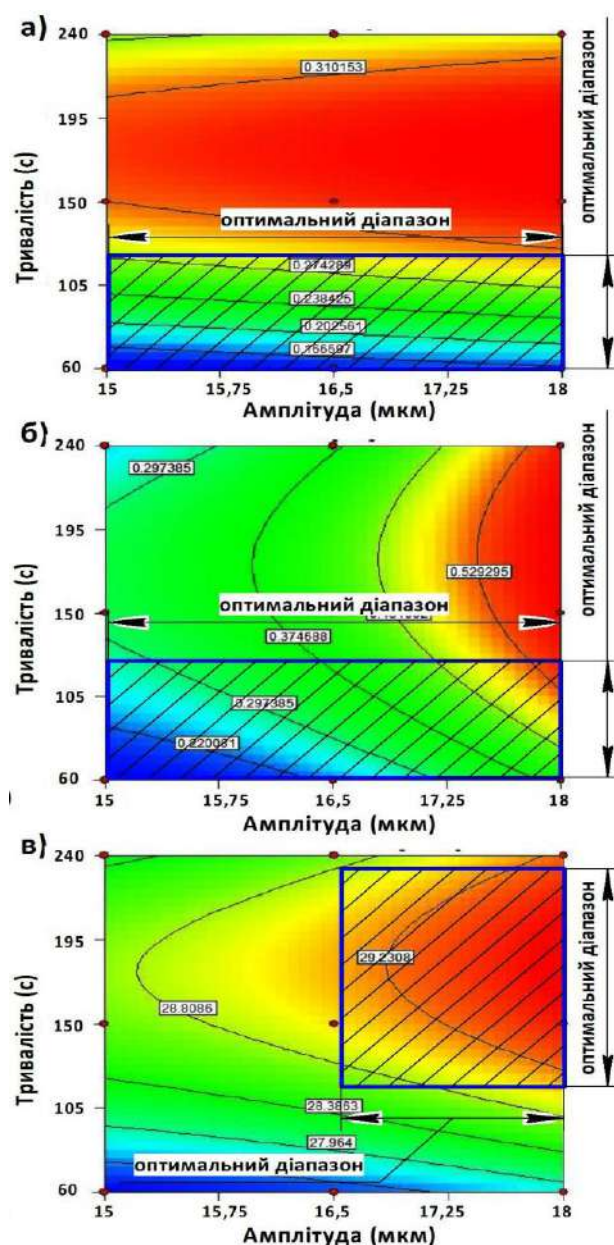


Рис. 5 – Вплив амплітуди ультразвукових коливань концентратора та тривалості УЗУО на шорсткість (а), хвилястість (б) та поверхневу твердість (в) сталі X12МФ у 2D площині

Таким чином, процес лазерного термозміцнення інструментальної сталі X12МФ, з використанням волоконного лазера та сканатора, доцільно реалізовувати при температурах нагрівання не більше 1300 °С, а для забезпечення повної

аустенізації прогрітих приповерхневих шарів, швидкість переміщення оброблюваної поверхні повинна складати приблизно 90 мм/хв.

На відміну від незначної зміни параметрів шорсткості/хвилястості оброблюваної поверхні з використанням волоконного лазера, поверхнево-пластична деформація інтенсифікована УЗУО досліджуваних зразків сприяє значному зменшенню параметрів шорсткості та формуванню регулярного мікрорельєфу на обробленій поверхні.

У порівнянні з вихідним станом ($R_a = 2,6$ мкм, $W_a = 1,66$ мкм) використання УЗУО дозволило зменшити параметр шорсткості R_a в 6 разів, а параметр хвилястості W_a в 2 рази в залежності від амплітуди ультразвукових коливань концентратора та тривалості УЗУО (рис. 4а,б). Найбільш помітне зниження параметру шорсткості ($R_a = 0,13$ мкм) зафіксовано після УЗУО на протязі 60 с та амплітуді ультразвукових коливань концентратора 15 мкм. При збільшенні амплітуди ультразвукових коливань концентратора параметри мікрорельєфу поверхні підвищуються (рис. 5а,б).

Крім того, УЗУО досліджуваної сталі також сприяє зміцненню поверхневого шару. Зокрема, найбільші значення твердості поверхні було отримано після УЗУО протягом 180 с та амплітуді ультразвукових коливань концентратора 18 мкм (рис. 4в). Однак подальше збільшення тривалості УЗУО (>180 с) при використаних амплітудах ультразвукових коливань викликало деяке зменшення твердості поверхні за рахунок індукованого знеміцнення (перенаклепу), що ініціює формування деформованого шару з утворенням різних дефектів (виривів, локальних пор, відшарувань). Підвищення амплітуди ультразвукових коливань концентратора сприяє збільшенню поверхневої твердості (рис. 5в). Таким чином, на основі вище приведених досліджень, найбільш ефективними є наступні технологічні режими УЗУО: амплітуда ультразвукових коливань концентратора 18 мкм, а тривалість УЗУО не більше 120 с при постійних величинах частоти обертання наконечника (~ 80 об/хв) та статичного навантаження інструменту (50 Н).

Висновки

Визначено діапазони оптимальних режимів ЛТО та УЗУО сталі Х12МФ з огляду на максимальні величини глибини зміцнення і твердості зміцненого шару при ЛТО та мінімальних параметрів мікрорельєфу та твердості поверхні при УЗУО.

Показано, що розроблені квадратичні регресійні моделі характеризується високою точністю та можуть бути використані для керування глибини зміцнення та твердості поверхні в залежності від температури нагрівання та швидкості ЛТО, а також параметрів мікрорельєфу та твердості поверхні в залежності від амплітуди ультразвукових коливань концентратора та тривалості УЗУО сталі Х12МФ.

Встановлено, що лазерну термообробку інструментальної сталі Х12МФ, з використанням волоконного Nd:YAG лазера та сканатора, доцільно реалізовувати при температурі нагрівання 1250...1300 °С та швидкості ЛТО 80...100 мм/хв, а наступну ультразвукову деформаційну обробку багатобойковим наконечником – при амплітуді ультразвукових коливань концентратора 18 мкм та тривалості УЗУО 100...120 с.

Робота фінансово підтримувалася проектом EWENT в рамках програми Erasmus Mundus Action 2 Lot 8. Автори статті вдячні проф. Ламікізу А. та наук. спів. Мартінез С. (Університет Країни Басків, м. Більбао, Іспанія) за надану можливість в проведенні експериментальних досліджень.

Список літератури

1. Kovalenko, V. S. Laser hardening of chrome steels / V. S. Kovalenko, L. F. Golovko // *The industrial laser handbook*, Springer-Verlag New York Inc. – 1992. – P. 121-122.
2. Aqida, S. N. An overview of laser surface modification of die steels / S. N. Aqida, S. Naher, M. Maurel, D. Brabazon // *Proc. Materials of 25th Int. Manuf. Conf., Dublin, Ireland 3-5 September*. – 2008. – P. 102-128.
3. Babic, M. Optimal fractal dimension on grain structure robot laser-hardened tool steel / M. Babic, J. Babic, P. Kokol // *Advances in Production Engineering & Management*. – 2014. – № 9. – P. 119-127. – doi:10.14743/apem2014.3.181.
4. Головко, Л. Ф. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Л. Ф. Головко, С. О. Лук'яненко // *Вісник, Київ*. – 2009. – 296 р.
5. Lee, J. H. Laser surface hardening of AISI H13 tool steel / J. M. Lee, J. H. Jang, B. D. Joo, Y. H. Moon // *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. – 2009. – № 19. – P. 917-920. – doi:10.1016/S1003-6326(08)60377-5.
6. Amine, T. Microstructural and hardness investigation of tool steel D2 processed by laser surface melting and alloying / T. Amine, J. W. Newkirk, H. El-Din, F. El-Sheikh, F. Liou // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – № 73. – P. 1427-1435. – doi:10.1007/s00170-014-5882-8.
7. Goia, F. A. Surface hardening of an AISI D6 cold work steel using a fiber laser / F. A. Goia, M. S. Fernandes de Lima, B. D. Joo, Y. H. Moon // *Journal of ASTM International*. – 2011. – № 8. – P. 1-9. – ID JAI103210.
8. Lesyk, D. A. An overview of laser surface modification of die steels / D. A. Lesyk, S. Martinez, V. I. Dzhemelinskyi, B. N. Mordiyuk, A. Lamikiz, G. I. Prokopenko // *Proc. Materials of Seventh Int. Conf.: Laser Technologies in Welding and Materials Processing, Odessa, Ukraine 14-18 September*. – 2015. – P. 31-32.
9. Wang, Z. Influence of shot peening on the fatigue life of laser hardened 17-4PH steel / Z. Wang, C. Jiang, X. Gan, Y. Chen, V. Ji // *International Journal of Fatigue*. – 2011. – № 33. – P. 549-556. – doi:10.1016/j.ijfatigue.2010.10.010.
10. Mordiyuk, B. N. Ultrasonic impact treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers in metallic materials / B. N. Mordiyuk, G. I. Prokopenko // In: M. Aliofkhazraei (Ed.), *Handbook of mechanical nanostructuring*, Wiley-VCH, Weinheim. – 2015. – P. 417-434 – doi:10.1002/9783527674947.ch17.
11. Lesyk, D. A. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel / D. A. Lesyk, S. Martinez, V. I. Dzhemelinskyi, A. Lamikiz,

B. N. Mordiyuk, G. I. Prokopenko // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – № 278. – P. 108-120. – doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.049.

Bibliography (transliterated)

1. **Kovalenko, V. S., Golovko, L. F.** Laser hardening of chrome steels. *The industrial laser handbook*, Springer-Verlag New York Inc, 1992, 121-122.
2. **Aqida, S. N., Naher, S., Maurel, M., Brabazon, D.** An overview of laser surface modification of die steels, *Proc. Materials of 25th Int. Manuf. Conf., Dublin, Ireland 3-5 September*, 2008, 102-128.
3. **Babic, M., Babic, J., Kokol, P.** Optimal fractal dimension on grain structure robot laser-hardened tool steel, *Advances in Production Engineering & Management*, 2014, **9**, 119-127, doi.org/10.14743/apem2014.3.181.
4. **Golovko, L. F., Luk"yanenko, S. O.** Lazerni tehnologii' ta komp'yuterne modeljuvannja [Laser technology and computer modeling]. Kyev: Vistka, 2009, 296.
5. **Lee, J. H., Jang, J. H., Joo, B. D., Moon, Y. H.** Laser surface hardening of AISI H13 tool steel, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2009, **19**, 917-920, doi:10.1016/S1003-6326(08)60377-5.
6. **Amine, T., Newkirk, J. W., El-Din, H., El-Sheikh, F., Liou, F.** Microstructural and hardness investigation of tool steel D2 processed by laser surface melting and alloying, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, **73**, 1427-1435, doi:10.1007/s00170-014-5882-8.
7. **Goia, F. A., Fernandes de Lima, M. S., Joo, B. D., Moon, Y. H.** Surface hardening of an AISI D6 cold work steel using a fiber laser, *Journal of ASTM International*, 2011, **8**, 1-9, ID JAI103210.
8. **Lesyk, D. A., Martinez, S., Dzhemelinskyi, V. V., B. N. Mordiyuk, Lamikiz, A., Prokopenko, G. I.** An overview of laser surface modification of die steels, *Proc. Materials of Seventh Int. Conf.: Laser Technologies in Welding and Materials Processing, Odessa, Ukraine 14-18 September*, 2015, 31-32.
9. **Wang, Z., Jiang, C., Gan, X., Chen, Y., Ji, V.** Influence of shot peening on the fatigue life of laser hardened 17-4PH steel, *International Journal of Fatigue*, 2011, **33**, 549-556, doi:10.1016/j.ijfatigue.2010.10.010.
10. **Mordiyuk, B. N., Prokopenko, G. I.** Ultrasonic impact treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers in metallic materials, *In. M. Aliofkhae (Ed.), Handbook of mechanical nanostructuring*, Wiley-VCH, Weinheim, 2015, 417-434, doi:10.1002/9783527674947.ch17.
11. **Lesyk, D. A., Martinez, S., Dzhemelinskyi, V. V., Lamikiz, A., Mordiyuk, B. N., Prokopenko, G. I.** Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel, *Surface and Coatings Technology*, 2015, **278**, 108-120, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.07.049.

Відомості про авторів (About authors)

Лесик Дмитро Анатолійович – кандидат технічних наук, асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», асистент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій; м. Київ, Україна; e-mail: lesyk_d@ukr.net.

Dmytro Lesyk – Scientific Degree (Ph. D.), assistant, Department of Laser Systems and Applied Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: lesyk_d@ukr.net.

Джемелінський Віталій Васильович – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій; м. Київ, Україна; e-mail: vityal.dzhemelinsky@gmail.com.

Vitaliy Dzhemelinskyi – Scientific Degree (Ph. D.), Professor, Department of Laser Systems and Applied Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: vityal.dzhemelinsky@gmail.com.

Мордюк Богдан Миколайович – доктор технічних наук, завідувач відділу, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, завідувач відділу фізичних основ інженерії поверхні; м. Київ, Україна; e-mail: mordiyuk@imp.kiev.ua.

Bogdan Mordiyuk – Scientific Degree (Ph. D.), DSc, Head of department for "Physical fundamentals of surface engineering", Kurdyumov Institute for Metal Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: mordiyuk@imp.kiev.ua.

Прокопенко Георгій Іванович – доктор технічних наук, провідник науковий співробітник, Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, провідний науковий співробітник відділу фізичних основ інженерії поверхні; м. Київ, Україна; e-mail: prokop@imp.kiev.ua.

Georgy Prokopenko – Scientific Degree (Ph. D.), DSc, Researcher of department for "Physical fundamentals of surface engineering", Kurdyumov Institute for Metal Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: prokop@imp.kiev.ua.

Данилейко Олександр Олександрович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», аспірант кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій; м. Київ, Україна; e-mail: danyleiko.oleksandr@gmail.com.

Oleksandr Danyleiko – PhD student, Department of Laser Systems and Applied Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: danyleiko.oleksandr@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лесик, Д. А. Визначення оптимальних режимів комбінованого лазерно-ультразвукового зміцнення інструментальної сталі X12MФ / **Д. А. Лесик, В. В. Джемелінський, Б. М. Мордюк, Г. І. Прокопенко, О. О. Данилейко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 23 (1245). – С. 27-35. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.05.

Please cite this article as:

Lesyk, D. A., Dzhemelinskyi, V. V., Mordyuk, B. N., Prokopenko, G. I., Danyleiko, O. O. Determination of optimum regimes of combined laser-ultrasonic hardening and finishing of tool steel AISI D2. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **23** (1245), 27–35. - doi:10.20998/2413-4295.2017.23.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лесик, Д. А. Определение оптимальных режимов комбинированного лазерно-ультразвукового упрочнения инструментальной стали X12МФ / **Д. А. Лесик, В. В. Джемелинский, Б. Н. Мордюк, Г. І. Прокопенко, А. А. Данилейко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 23 (1245). – С. 27-35. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.05.

АННОТАЦИЯ В данной работе для повышения физико-механических свойств рабочих поверхностей изделий предложен способ комбинированного лазерно-ультразвукового поверхностного упрочнения с использованием сканирующего лазерного луча и ультразвукового багатобойкового наконечника. Для реализации комбинированного термдеформационного упрочнения и отделки определено влияние режимов лазерной термообработки и ультразвуковой ударной обработки на свойства поверхностного слоя стали X12МФ с использованием многофакторного эксперимента с элементами анализа дисперсии и уравнений регрессии. Установлено, что процесс лазерного термоупрочнения стали необходимо реализовывать при температуре нагрева 1250...1300 °С и скорости обработки 80...100 мм/мин., а процесс ультразвукового деформационного упрочнения – при амплитуде ультразвуковых колебаний 18 мкм и продолжительности обработки 100...120 с.

Ключевые слова: лазерная термообработка; ультразвуковая ударная обработка; сталь X12МФ; поверхностный слой; твердость; шероховатость.

Надійшла (received) 30.05.2017